Vojtěch Hrubý Úloha 4

Pracovní úkol

1. Změřte současně světelnou i voltampérovou charakteristiku polovodičového laseru. Naměřené závislosti zpracujte graficky. Stanovte prahový proud i_0.
2. Pomocí Hg výbojky okalibrujte stupnici monochromátoru SPM2
3. Změřte emisní spektrum polovodičového laseru při několika hodnotách proudu laserem pod a nad odhadnutou prahovou hodnotou i_0. Určete vlnovou délku stimulované emise a kvalitativně diskutujte změny ve spektrech provázející změnu napájecího proudu.
4. Z modové struktury emisního spektra laseru určete aktivní délku rezonátoru. Diskutujte, proč je volena velmi úzká štěrbina monochromátoru.
5. Určete výkonovou účinnost laseru pro vybranou hodnotu proudu v nadprahové oblasti.

Teoretická část

Polovodičový laser je tvořen P-N přechodem, kterým protéká elektrický proud v propustném směru. Při nízkých hodnotách proudu převládá spontánní emise srovnatelná s běžnou luminiscenční diodou. Překročí-li proud prahovou hodnotu i_0, záření se začne stimulovanou emisí zesilovat a dioda přejde do laserového stavu, pro který je charakteristické velmi úzké spektrum. Tuto hodnotu proudu můžeme určit ze světelné charakteristiky tak, že najdeme bod, kde se prudce zvyšuje směrnice křivky. Ten odpovídá prahovému proudu.

Mezi důležité parametry patří výkonová účinnost laseru definovaná vztahem

$$\eta = \frac{\Phi_e}{U \cdot i}, \tag{1}$$

kde Φ_e je zářivý tok diody, U napětí a i proud procházející diodou.

Mezi odrazovými plochami Fabry-Perotova rezonátoru o délce L vzniká stojaté elektromagnetické vlnění. Vzniká tak diskrétní laserové spektrum. Vzdálenost sousedních módů ve stupnici vlnových délek je

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2LN_g}, \tag{2}$$

kde N_g je grupový index lomu a L je délka rezonátoru, kterou můžeme z tohoto vztahu určit naměřením modové struktury spektra.

Měření

Nejprve jsem proměřil voltampérovou a světelnou charakteristiku laseru. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Světelný tok jsem měřil pomocí galvanometru. Uvádím v tabulce hodnotu z jeho stupnice a odpovídající světelný tok. Využil jsem údaje výrobce, který říká, že při proudu $i = 115\,\mathrm{mA}$ je světelný tok $\Phi = 0.5\,\mathrm{mW}$. V grafech 1 a 2 jsou zobrazeny příslušné závislosti.

Světelnou účinnost laseru jsem stanovil podle vztahu (1) při proudu 114.9 mA

$$\eta = 0.23\,\%.$$

U [V]	I [mA]	Φ [dílky]	Φ [μW]
1.891	114.9	28.0	500
1.876	110.1	23.0	411
1.860	105.1	19.5	348
1.843	100.0	16.5	295
1.827	95.0	14.5	259
1.810	90.0	12.5	223
1.793	85.0	11.0	196
1.775	80.0	9.5	170
1.757	75.0	8.5	152
1.739	70.0	7.5	134
1.720	65.0	7.0	125
1.701	60.0	6.0	107
1.681	55.0	5.0	89
1.662	50.0	3.9	69.6
1.641	45.0	3.4	60.7
1.619	40.0	3.0	53.6
1.597	35.0	2.6	46.4
1.573	30.0	2.2	39.3
1.548	25.0	1.8	32.1
1.521	20.0	1.3	23.2
1.491	15.0	0.9	16.1
1.454	10.0	0.6	10.7
1.401	5.0	0.2	3.6
1.374	3.47	0	0
1.349	2.46	0	0
1.296	1.207	0	0
1.217	0.407	0	0
1.147	0.1375	0	0
1.097	0.0575	0	0
1.001	0.0099	0	0
0.907	0.0017	0	0
0.808	0.0003	0	0

Tabulka 1.: Voltampérová a světelná charakteristika laserové diody

Proud i_0 jsem odhadl z grafu 2 na

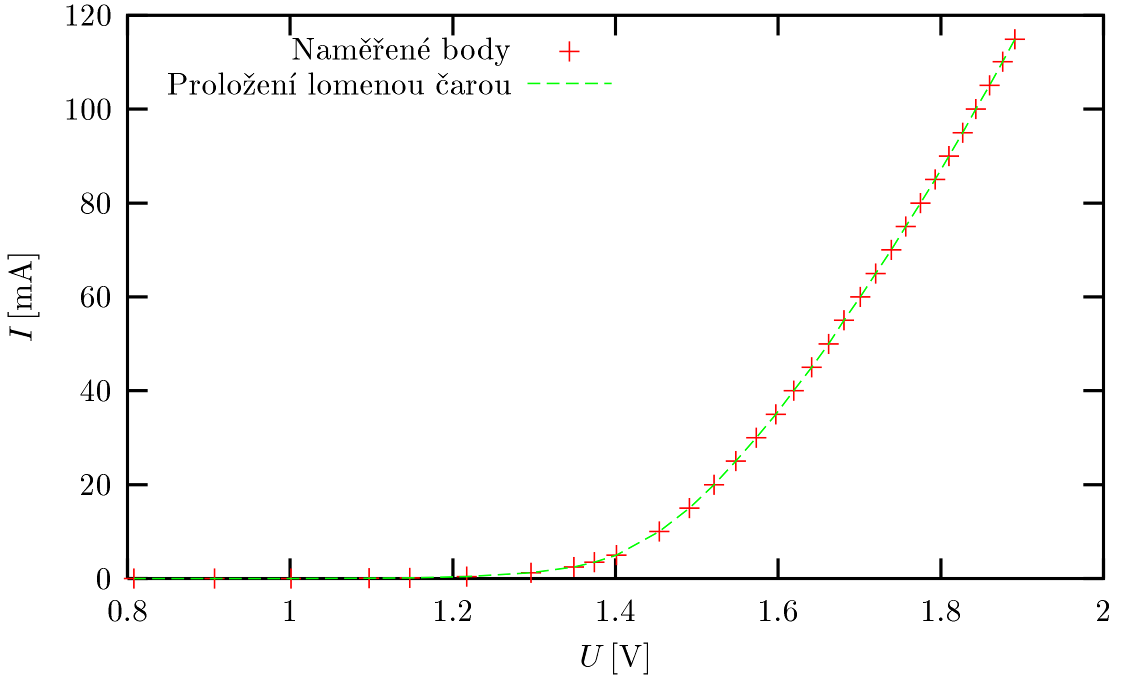
$$i_0 = (105 \pm 10)\,\mathrm{mA}.$$

Stupnici monochromátoru jsem okalibroval pomocí rtuťové výbojky, jejíž spektrum je zobrazeno v grafu 3. Využil jsem čáry 435 nm (18.1983°) a 546 nm (20.2766°). Převodní vztah mezi stupni monochromátoru a vlnovou délkou je

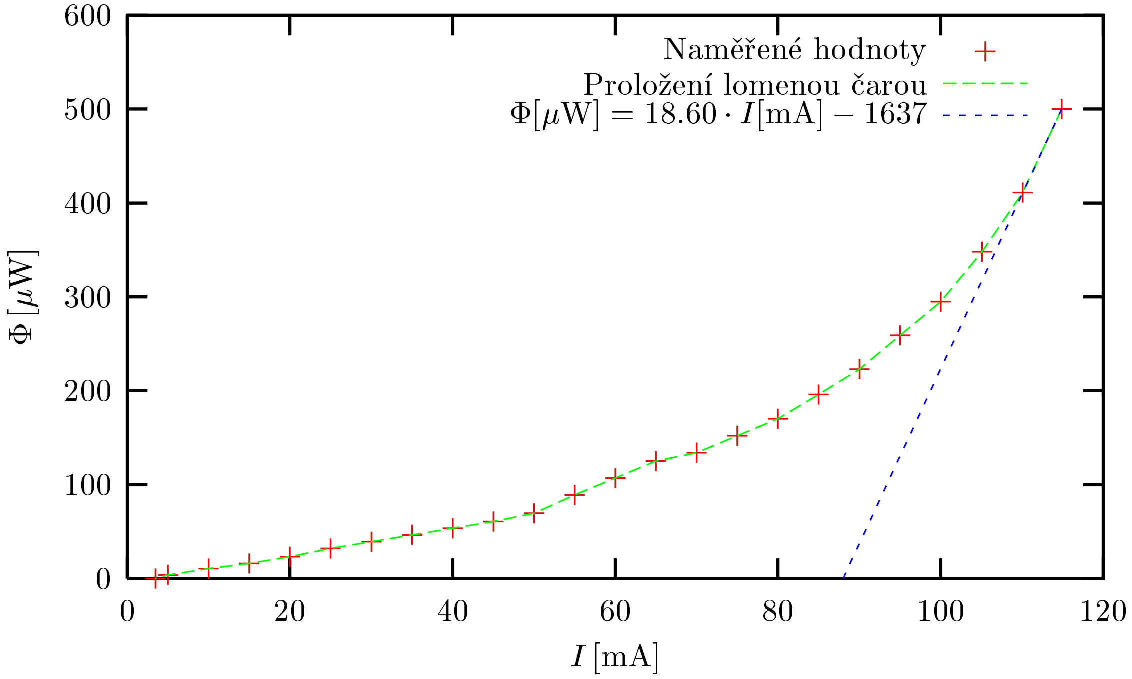
$$\lambda\,[\mathrm{nm}] = 53.409 \cdot s - 536.95.$$

Následně jsem proměřil emisní spektrum laseru. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafu 4. Vlnovou délku stimulované emise jsem odečetl

$$\lambda_l = 821.0 \pm 0.2\,\mathrm{nm}.$$



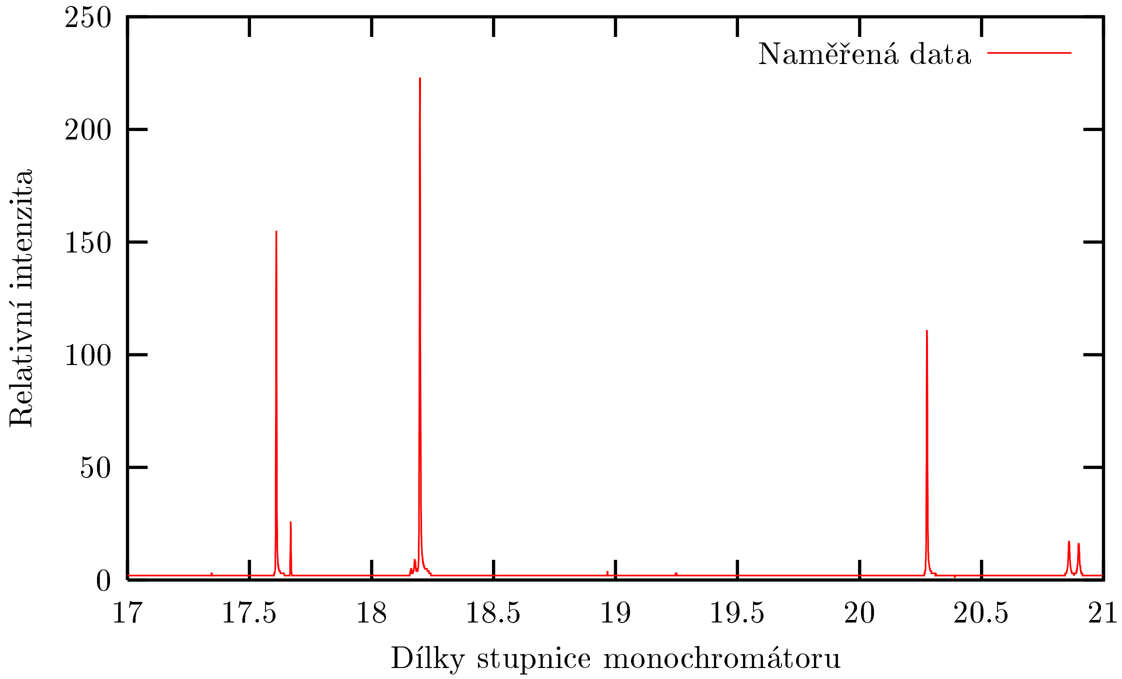
Graf 1.: Voltampérová charakteristika laserové diody



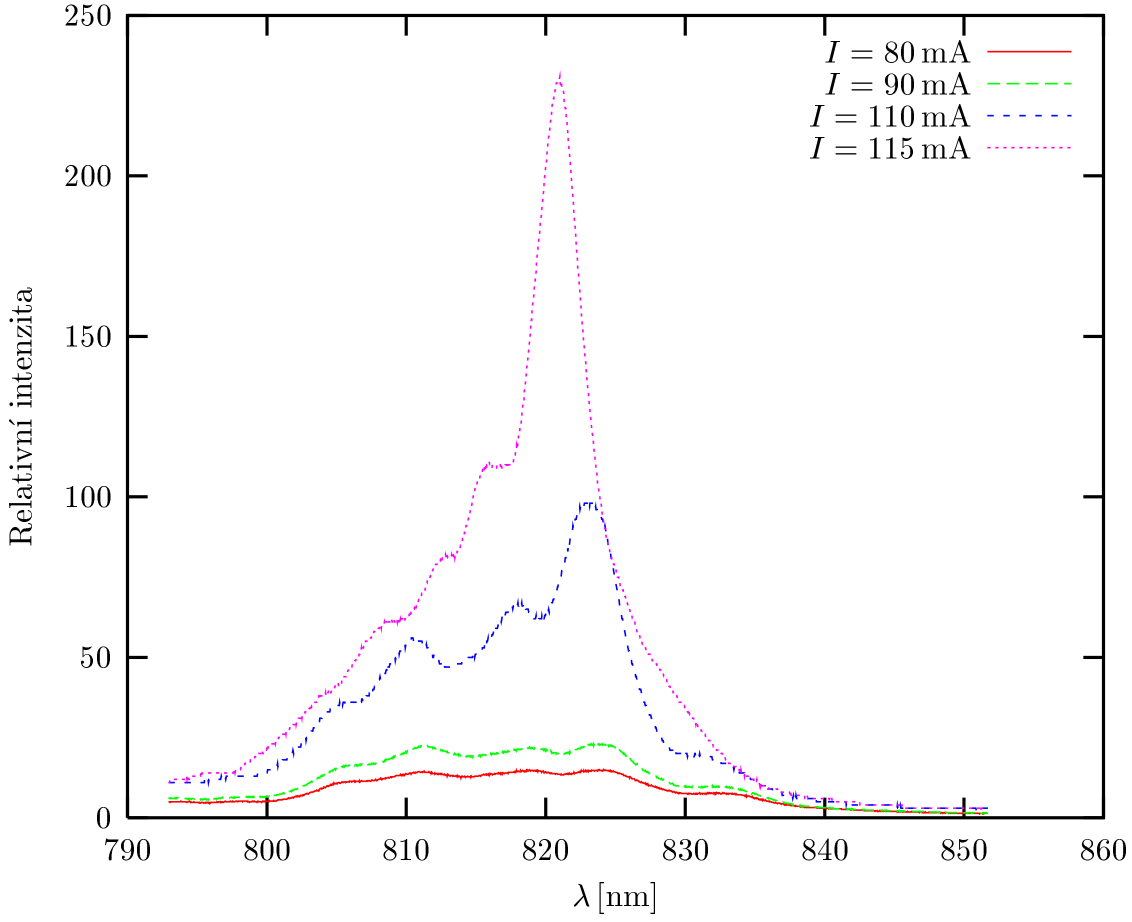
Graf 2.: Závislost vyzařovaného výkonu laserové diody na protékajícím proudu. V grafu jsem zobrazil také směrnici pro nejvyšší měřené proudy. Lze z ní odhadnou prahovou hodnotu proudu i_0.

Chyba této hodnoty je vztažena pouze k spektru při proudu $i = 115\,\mathrm{mA}$, ukázalo se při měření, že je stimulovaná emise na proudu závislá. Měření proběhlo se štěrbinou $0.4\,\mathrm{mm}$

Modovou strukturu emisního spektra jsem měřil při proudu $110\,\mathrm{mA}$ a štěrbině



Graf 3.: Spektrum rtuťové výbojky



Graf 4.: Emisní spektra laseru pro různé hodnoty protékajícího proudu

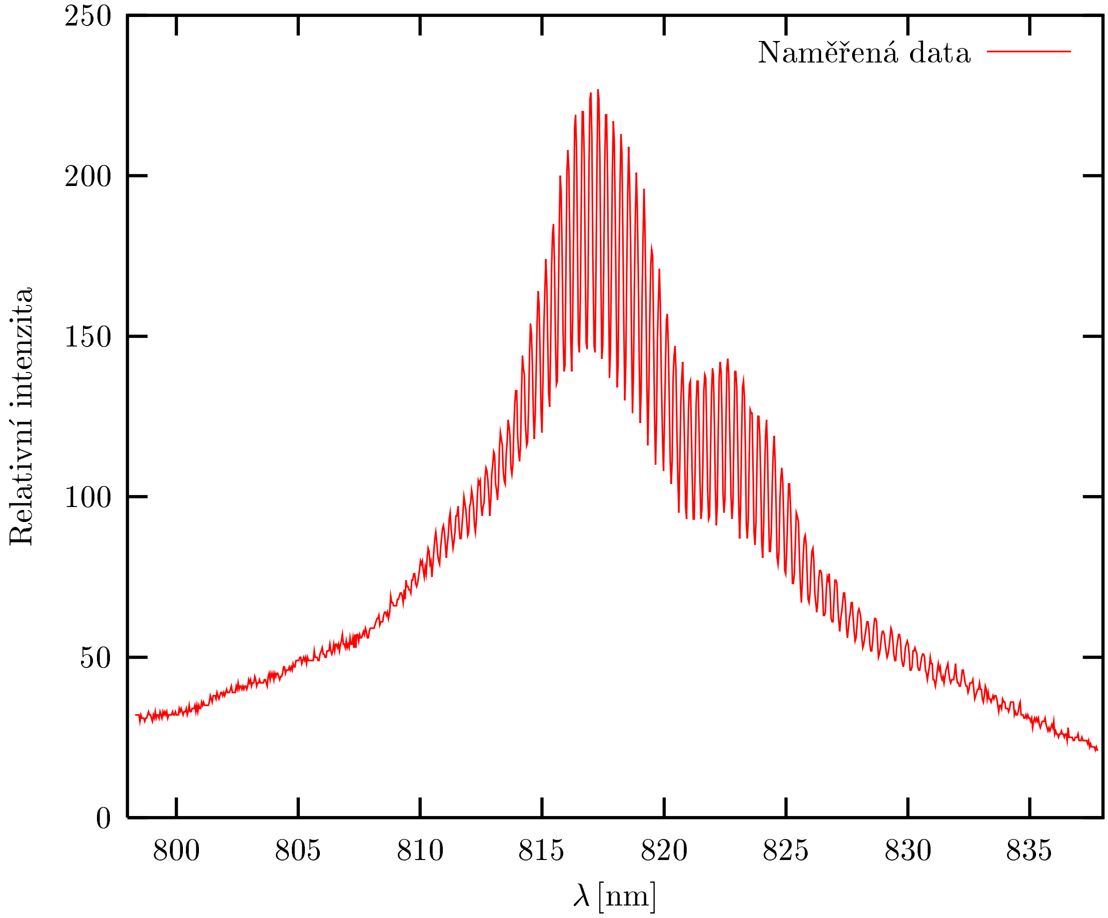
0.07 mm. Naměřená data jsou zobrazena v grafech 5 a 6. Pro výpočet aktivní délky rezonátoru jsem zvolil oblast v okolí 821.0 nm. Odpočítal jsem 5 period modové struktury a jako $\Delta\lambda$ jsem vzal aritmetický průměr. Větší interval by zanesl chybu, protože vlnová délka není konstantní. Na druhou stranu bylo potřeba zvolit interval větší než je jedna perioda kvůli vzorkování. Určil jsem

$$\Delta\lambda = (0.32 \pm 0.01)\,\mathrm{nm},$$

a dále jsem vypočítal aktivní délku rezonátoru ze vztahu 2

$$L = (236 \pm 40)\,\mu\mathrm{m},$$

kde $N_g = 4.5$.

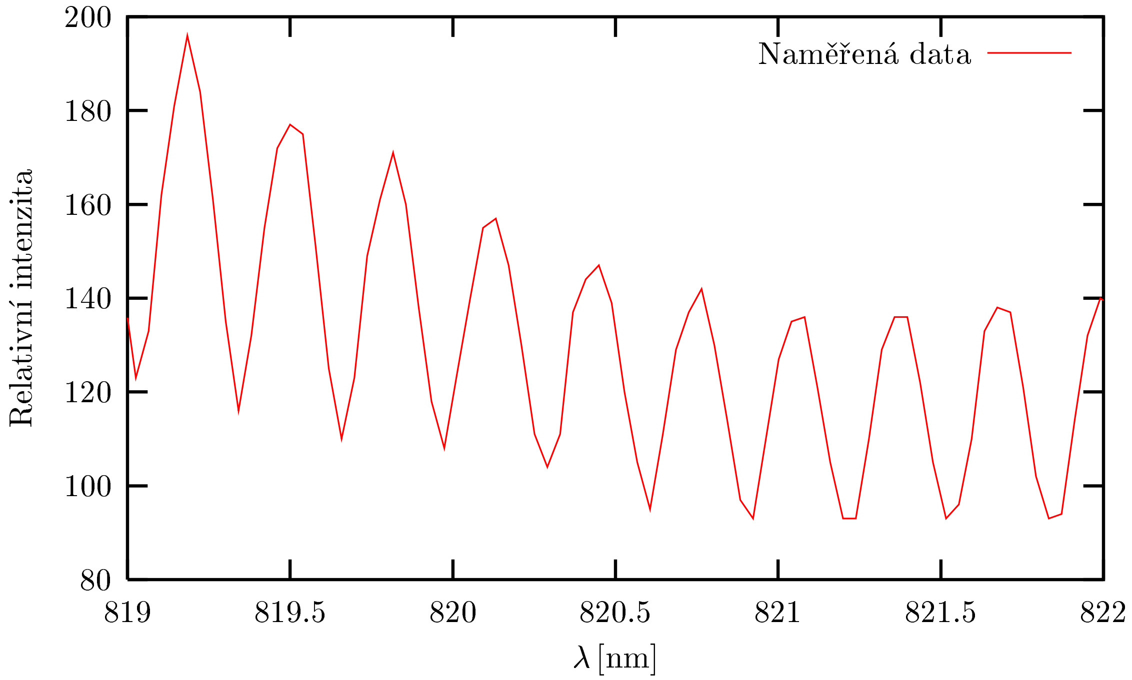


Graf 5.: Modová struktura emisního spektra

Diskuse

Voltampérová charakteristika odpovídá chování běžné diody, nicméně je citelně méně strmá. Při měření světelné charakteristiky se nepodařilo naměřit předpokládaný ostrý zlom, který by odpovídal prahové hodnotě procházejícího proudu. Křivka světelné charakteristiky stoupá spíše pozvolna. Nicméně i tak bylo možné alespoň odhadnout hodnotu prahového proudu.

Měření emisního spektra laserové diody přineslo víceméně očekávané výsledky. Při nízkých proudech se dioda chová jako běžná luminiscenční dioda, při vyšších proudech



Graf 6.: Deltail modové struktury emisního spektra

převládá stimulovaná emise—charakteristika se zužuje a zvyšuje, je zřetelná charakteristická vlnová délka laseru. Překvapením jistě bylo, že maximum spektra neodpovídá stejné vlnové délce pro obě měření v nadprahové oblasti. Přikláním se k měření při vyšším proudu, protože v tomto případě je stimulovaná emise podstatně výraznější.

Při měření modové charakteristiky je potřeba nastavit velmi úzkou štěrbinu. Šířka štěrbiny totiž určuje, jak široké spektrum prochází najednou do fotonásobiče. Pokud je štěrbina příliš široká, prochází více vlnových délek a modová struktura se setře.

Závěr

Měření přineslo ve většině případů očekávané výsledky. Neskrývám překvapení, že se mění maximální vlnová délka laseru s rostoucím proudem nad prahovou hodnotou. Prahová hodnota proudu je

$$i_0 = (105 \pm 10)\,\mathrm{mA},$$

vlnová délka stimulované emise při proudu 115 mA je

$$\lambda_l = 821.0 \pm 0.2\,\mathrm{nm},$$

délka aktivní oblasti rezonátoru je

$$L = (236 \pm 40)\,\mu\mathrm{m}$$

a účinnost laseru při proudu 115 mA je

$$\eta = 0.23\,\%.$$

Literatura

[1] Englich, J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření. Praha 2000.

[2] `physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp`: Studijní text a Pokyny k měření.